هشتمین کنفرانس ملی
مطالعات مدیریت و اقتصاد در علوم انسانی
8th National Conference on
Management Studies and Economics in the Humanities
www.spconf.ir

ارائه یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی

پریا حاجی وهاب‌زاده (نویسنده مسئول)[1]، مهرزاد نوابخش[2]

[1]دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب ، دانشکده مدیریت، تهران pariya.ph45@yahoo.com

[2] استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب ، دانشکده مدیریت، تهران mehrzadnava@gmail.com

چکیده

بسیاری از کشورهایی که انرژی خود را از منابع سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کنند ، به منابع تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست روی آورده‌اند تا نگرانی‌های فزاینده در مورد گرمایش زمین و مسائل زیست‌محیطی را کاهش دهند. فناوری زیست انرژی یکی از گزینه‌های بالقوه برای سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است. این پژوهش فناوری‌های تولید انرژی زیستی پایدار را از طریق مطالعه موردی در ایران مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این پژوهش یک روش جامع توسعه یافته است که در آن کارشناسان و تصمیم‌گیرندگان قادر به استفاده از اصطلاحات زبانی برای بیان نظرات خود و مشارکت در تصمیم‌گیری‌های مورد نیاز برای اولویت‌بندی ابعادی هستند که بر پایداری فنآوری‌های تولید انرژی زیستی تأثیر می‌گذارد. شناسایی فناوری بهینه تولید انرژی زیستی و تعیین اولویت‌های آن کار دشواری است. بسیاری از ابعاد مانند ابعاد زیست‌محیطی، فنی، اقتصادی و اجتماعی و زیرشاخص‌های آن‌ها باید در فرایند ارزیابی مورد توجه قرار گیرد. بنابراین این پژوهش از یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] (MCDM) استفاده کرده است تا بسیاری از ابعاد متناقض را در نظر گیرد. در این راستا، از روش AHP[2] برای شناسایی اهمیت نسبی ابعاد و شاخص‌های فرعی آن‌ها استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T1) بهترین فناوری انرژی زیستی پایدار است.

واژه‌های کلیدی

فناوری‌های تولید انرژی زیستی، پایداری، تصمیم‌گیری چندمعیاره، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

[1] Multi-Criteria Decision Making
[2] Analytical Hierarchy Process

1. مقدمه

بسیاری از کشورهایی که انرژی خود را از منابع سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کنند ، به منابع تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست روی آورده‌اند تا نگرانی‌های فزاینده در مورد گرمایش زمین و مسائل زیست‌محیطی را کاهش دهند. فناوری زیست انرژی یکی از گزینه‌های بالقوه برای سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است. شناسایی فناوری بهینه تولید انرژی زیستی و تعیین اولویت‌های آن کار دشواری است. بسیاری از ابعاد مانند ابعاد زیست‌محیطی، فنی، اقتصادی و اجتماعی و زیرشاخص‌های آن‌ها باید در فرایند ارزیابی مورد توجه قرار گیرد. بنابراین این پژوهش درصدد بوده است تا از یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره[3] (MCDM) استفاده کند که بسیاری از ابعاد متناقض را در نظر می‌گیرد. انرژی در دنیای معاصر نقش حیاتی و ضروری ایفا می‌کند و میزان مصرف انرژی به شاخص پیشرفت مردم و ملت‌ها تبدیل شده است [3]. بنابراین، به دلیل سرعت تخلیه، هزینه بالای بهره‌برداری و تأثیر منفی منابع انرژی تجدیدناپذیر متعارف (مانند زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی) بر محیط زیست از یک سو و به دلیل توانایی منابع انرژی تجدیدپذیر در کاهش آلودگی زیست‌محیطی و کاهش فشار بر استفاده از انرژی‌های متعارف و هزینه پایین آن‌ها از سوی دیگر، علاقه زیادی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سازگار با محیط زیست وجود دارد [4]. امروزه انرژی یکی از مهم‌ترین کالاهای اقتصادی و استراتژیک است، بنابراین استراتژی‌های انرژی از دغدغه‌های اصلی بسیاری از کشورها اعم از تولیدکننده و واردکننده انرژی است [5]، زیرا آن‌ها به دنبال تأمین منابع انرژی اضافی و دائمی با کمترین هزینه و به ویژه، استفاده از منابع انرژی جایگزین هستند [6]. برخلاف سوخت‌های فسیلی که صدها سال طول می‌کشد تا تشکیل شود، زیست‌توده یک منبع انرژی تجدیدپذیر است که به راحتی قابل جمع‌آوری، ذخیره، استفاده و جایگزینی سریع بدون کاهش منابع طبیعی است [7]. انرژی زیستی که به عنوان انرژی استخراج شده از مواد آلی با منشاء گیاهی یا حیوانی تعریف می‌شود، یکی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی تجدیدپذیر است، زیرا با انتشار گازهای مضر کمتر در مقایسه با سوخت‌های سنتی، در هنگام سوزاندن سوخت متمایز می‌شود [8]. زیست‌توده به دو گروه زیست‌توده زمینی شامل مواد اولیه و سلولز زیست‌توده مبتنی بر نشاسته، روغنی و سلولزی و زیست‌توده آبی شامل جلبک‌های زیرین، سیانوباکتری‌ها و ماکروجلبک‌ها تقسیم می‌شود [9]. علاقه فزاینده‌ای به زیست‌توده آبزیان وجود دارد زیرا سطح آب روی زمین چندین برابر بزرگتر از زمین‌های موجود است که بیشتر آن برای رشد زیست‌توده خشکی بسیار خشک است. علف‌های هرز آبزی در مقایسه با گیاهان خشکی‌زی بهره‌وری بالاتری دارند [7]. طیف وسیعی از منابع زیست‌توده در اشکال جامد، مایع و گاز وجود دارد که می‌توان با استفاده از بسیاری از فن‌آوری‌ها به اشکال مختلف انرژی زیستی، از جمله گرما، انرژی، یا سوخت‌های زیستی تبدیل کرد [10]. زیست‌توده را می‌توان برای گرمایش مستقیم در کاربردهای خانگی و صنعتی، برای تولید سوخت به صورت مایع یا گاز، و برای تولید بخار برای تولید برق استفاده کرد. گرمایش مستقیم قدیمی‌ترین و جامع‌ترین کاربرد است، اما سوخت‌های زیستی و تولید برق به طور فزاینده‌ای در بین سیاست‌گذاران انرژی در حال محبوب شدن هستند [11]. انواع سوخت‌های زیستی را می‌توان از زیست‌توده برای بخش حمل و نقل به دست آورد و شامل اتانول، بیودیزل و سوخت‌های زیستی پیشرفته می‌شود [12]. محدودیت منابع فسیلی و تجدیدناپذیر بودن این منابع موجب گردیده است تا سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان بخش انرژی با انجام مطالعات ساختاری، تغییر حامل‌های انرژی و حرکت به سوی سوخت‌های پاک را در رئوس برنامه‌های کاری خود قرار دهند. یکی از این گزینه‌ها، استفاده از حاملان انرژی حاصل از منابع زیست‌توده می‌باشد. استفاده صحیح از منابع زیست‌توده همچنان که مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان است، بایستی در برنامه‌های توسعه کشور ما نیز بیش از پیش مدنظر قرار گیرد. استفاده از زیست‌توده به عنوان یک منبع انرژی نه تنها به دلایل اقتصادی، بلکه به دلیل توسعه بهداشتی و زیست‌محیطی نیز جذاب می‌باشد. زیرا فناوری‌های تولید انرژی، ضایعات زیستی را به انرژی با فرآورده‌های انرژی‌زا تبدیل می‌کند. گرجی تهرانی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهش مروری با عنوان بررسی و اولویت‌بندی فناوری‌های مختلف تولید انرژی از منابع زیست‌توده به بررسی فناوری‌های مرسوم برای تبدیل منابع زیست‌توده به انرژی، اولویت‌بندی فناوری‌ها از نظر کاربرد و بررسی تولید برق از فناوری‌های منتخب منابع زیست‌توده پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد زیست‌توده به عنوان چهارمین منبع اصلی انرژی بشر و به عنوان بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر در جهان محسوب می‌گردد. همچنین مهم‌ترین منبع انرژی در کشورهای در حال توسعه است که حدود سه چهارم از جمعیت جهان در آن زندگی می‌کنند. ضمنا مصرف انرژی زیست‌توده در چند کشور صنعتی از اهمیت برخوردار است. با در نظر گرفتن شرایط تهیه و پیشرفت فناوری زیست‌توده خوش‌بینی بسیار زیادی وجود دارد که زیست‌توده در آینده نقش مهمی در تأمین انرژی موردنیاز بشر ایفا نماید. زیست‌توده قابلیت تولید برق، حرارت، سوخت های گازی، مایع وجامد با انواع کاربردهای مفید شیمیایی را دارا می‌باشد. نتایج بررسی انجام شده در این پژوهش برای نیل به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مناسب در مقایسه فناوری‌های تبدیل زیست‌توده به انرژی، چند معیار تعیین گردیده تا براساس آن‌ها بتوان مقایسه مناسب و مستدلی انجام داد. در انتخاب معیارها، پیش از هر چیز نیازها و شرایط کشور بایستی در نظر گرفته شود. چند مورد که از اهمیت بیشتری برخوردار هستند عبارتند از: تأمین انرژی مورد نیاز مناطق دورافتاده و نیازمند- استفاده بهینه از مواد زائد و ضایعات- امکان اجرای فناوری، سادگی نسبی و کاهش نیاز به انتقال فناوری و سازگاری با فناوری‌های دیگر تبدیل و مصرف انرژی [1]. اوتادی و احمدپور (۱۳۹۱) در پژوهشی با عنوان بررسی روش‌های تولید انرژی از زیست‌توده ضمن بررسی روش‌های مختلف تولید انرژی از زیست‌توده، به معایب و مزیت‌های این قبیل روش‌ها پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد زیست‌توده بزرگ‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر در حال حاضر است که تقریبا ۱۱ درصد مصرف کل انرژی جهان را دربر می‌گیرد. مطالعات متعددی روی پتانسیل تولید زیست‌توده برای انرژی در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی انجام شده است. بسیاری از مطالعات برآورد کرده‌اند که استفاده از زیست‌توده برای تولید انرژی می‌تواند افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به سطح موجود یابد. مزایای استفاده از سوخت‌های زیستی عبارتند از:

- سوخت‌های زیستی قابل تولید از منابع زیست توده معمولی هستند
- این سوخت‌ها یک سیکل دی‌اکسیدکربن در فرایند احتراق دارند و در نتیجه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به شدت کاهش می‌یابد.

[3] Multi-Criteria Decision Making

- سوخت‌های زیستی دارای پتانسیل قابل‌توجه سازگاری با محیط زیست هستند و زیست تخریب‌پذیر می‌باشند.
- تولید این سوخت‌ها یک بازار جدید برای محصولات کشاورزی ایجاد می‌کند.
- با تولید این سوخت‌ها مصرف سوخت‌های فسیلی کاهش می‌یابد.
- انواع متنوعی از سوخت‌ها قابل تولید از زیست‌توده هستند.

اما محدودیت‌های استفاده از سوخت‌های زیستی عبارتند از:

موانع تولید سوخت زیستی شامل موارد زیر است که البته تا حدودی رفع شده‌اند:

- رقابت با تولید غذا و فیبر برای استفاده از زمین قابل زرع
- هزینه
- ساختار بازار منطقه‌ای
- حمل زیست توده
- فقدان فعالیت‌های کشاورزی خوب مدیریت شده در اقتصادهای نوظهور
- استفاده از آب و کود
- حفاظت از تنوع زیستی
- شبکه‌های توزیع و تدارکات [2]

هدف از این پژوهش، بررسی فناوری‌های مرسوم برای تبدیل منابع زیست‌توده به انرژی و اولویت‌بندی فناوری‌های منتخب تولید برق برای منابع مختلف زیست‌توده می‌باشد. هیدروژن کاربردهای قابل‌توجهی در جامعه دارد، بنابراین محققان همچنان به دنبال روش‌های تولید پایدار از نظر مواد درگیر در واکنش با هزینه مناسب و معقول هستند. هیدروژن علاوه بر کاربردهای آن در طیف گسترده‌ای از فرآیندهای شیمیایی، یکی از جایگزین‌های جدید برای انرژی نیز می‌باشد، زیرا احتراق آن تأثیر زیست محیطی بسیار کمی دارد و میزان حرارت احتراق تقریبا سه برابر گرمای همان جرم است. متأسفانه، اکثر سیستم‌های تولید هیدروژن به سوخت‌های فسیلی متکی هستند، بنابراین پژوهش‌های قابل‌توجهی برای اطمینان از پایداری بیشتر این سیستم‌های تولید مورد نیاز است. پایداری در تولید هیدروژن مستلزم آسیب نرساندن به محیط زیست و تولید به روشی تمیز، ایمن، قابل‌اعتماد و مقرون به صرفه است. انرژی زیستی نوعی انرژی تجدیدپذیر است که به طور بالقوه می‌تواند به طیف وسیعی از اهداف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی و درنتیجه، به توسعه پایدار کمک کند. ارزیابی، مدیریت و نظارت بر جایگزین‌های متنوع فناوری تولید انرژی زیستی ماهیت پیچیده‌ای دارد و به دلیل فقدان داده‌های دقیق و جامع، مزایای متفاوتی را به همراه دارد. انتخاب یک فناوری بهینه تولید انرژی زیستی یک مشکل پیچیده تصمیم‌گیری چند معیاره در نظر گرفته می‌شود که شامل بسیاری از معیارهای ملموس و ناملموس ناسازگار و همچنین کیفی و کمی است. بنابراین، پژوهش حاضر به دنبال کاربرد یک رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره برای ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی بوده است.

2. روش‌شناسی

در این پژوهش به شناسایی و تعیین وزن شاخص‌ها و زیرشاخص‌های مناسب برای ارزیابی پایداری فناوری‌های تولیدکننده انرژی بیوزیستی پرداخته شده است. این معیارها با توجه مرور عمیق ادبیات پژوهش استخراج شده‌اند. این پژوهش از منظر نحوه جمع‌آوری داده‌ها به دلیل مراجعه به خبرگان حوزه‌ی فناوری‌های تولید انرژی بیوزیستی از نوع میدانی و از بعد هدف کاربردی می‌باشد. جامعه آماری این پژوهش را خبرگان و متخصصین حوزه‌ی فناوری‌های تولید انرژی بیوزیستی با مدرک کارشناسی و بالاتر و حداقل ۵ سال سابقه کار در زمینه تولید انرژی‌های بیوزیستی که در این حوزه به واسطه تجارب علمی و کاری صاحب‌نظر هستند، تشکیل می‌دهند که سعی شده است با مراجعه به زیرمجموعه‌ها و مدیران واحدهای مختلف سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) با روش غیرتصادفی هدفمند از نوع قضاوتی افرادی که دارای صلاحیت لازم جهت شرکت در این پژوهش هستند، شناسایی شده و برای تکمیل پرسشنامه‌ی مقایسات زوجی به آن‌ها مراجعه شود. مانند بسیاری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به ویژه AHP، کیفیت جامعه آماری یا به عبارتی کیفیت نظردهندگان و میزان خبرگی آن‌ها ملاک محسوب می‌شود و کمیت از اهمیت زیادی برخوردار نیست کما اینکه تعداد زیاد نظردهندگان اگر ناشی از سطح کیفیت پایین آن‌ها باشد از کارآیی این قبیل روش‌ها خواهد کاست، لذا در این پژوهش ۲۰ خبره برای پاسخگویی به پرسشنامه مقایسات زوجی مورد سؤال قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر، برای گردآوری داده‌ها از روش‌های کتابخانه‌ای شامل مطالعه و فیش‌برداری از کتب و مقالات مرتبط و بررسی گزارش‌ها، مستندات و میدانی شامل تهیه پرسشنامه مقایسات زوجی و توزیع آن بین خبرگان استفاده شده است.

در روش میدانی پژوهش، پرسشنامه مقایسات زوجی تکمیل و سپس وارد مرحله تجزیه و تحلیل نهایی شده است. پرسشنامه مقایسات زوجی بر اساس مدل سلسله‌مراتبی پژوهش حاضر تدوین شده است که در آن ابتدا شاخص‌های مناسب برای پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی و همچنین زیرشاخص‌های هر کدام از آن‌ها به صورت دو به دو و بر اساس نظر خبرگان پژوهش با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

3. تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه‌ی فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده گردیده است که این کار دقت و صحت نتیجه را تا سطح قابل‌توجهی بالا می‌برد. هدف مسئله شناسایی و رتبه‌بندی معیارهای مناسب برای ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی و رتبه‌بندی این فناوری‌ها است. معیارهای تأثیرگذار در طراحی مدل با توجه به مرور و بررسی پیشنه پژوهش و نظر خبرگان این حوزه مشخص گردیده است.

1.3. مدل مفهومی پژوهش

1.1.3. شاخص زیست‌محیطی

بعد محیطی یکی از عواملی است که باید در انتخاب فناوری تولید انرژی زیستی مورد توجه قرار گیرد. این شاخص شامل پنج شاخص فرعی کمک به تغییرات آب و هوا، استفاده از آب، انحطاط کیفیت خاک، تغییر کاربری زمین، و آلودگی هوا، آب و زمین است که تمام جنبه های بعد زیست‌محیطی را پوشش می‌دهد [13] [7] [12].

- **کمک به تغییرات آب و هوا**

این شاخص به تغییرات آب و هوا در نتیجه انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از برخی سیستم های تولید انرژی زیستی از جمله دی اکسید نیتروژن و دی اکسید کربن اشاره دارد [14]. قابل توجه است که انرژی زیستی به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای مانند دی اکسید کربن که در طی فرآیند فتوسنتز جذب می شوند، کمک می کند. انرژی زیستی همچنین ممکن است از طریق استفاده از سوخت‌های فسیلی در فرآیند تولید انرژی زیستی به انتشار برخی از گازهای گلخانه‌ای کمک کند [7].

- **مصرف آب**

استفاده از آب نشان دهنده برداشت آب های سطحی یا زیرزمینی برای تولید مواد خام برای انرژی زیستی است [7]. تولید مواد خام برای انرژی زیستی به مقدار زیادی آب نیاز دارد و این نامرئی‌ترین نقطه ضعف سوخت های زیست توده است. از این رو، اگر آب کافی در دسترس نباشد، سیستم های آبیاری باید توسعه یابد که ممکن است پرهزینه باشد. این امر ممکن است دسترسی به آب را برای انسان و حیات وحش کاهش دهد.

- **انحطاط کیفیت خاک**

این شاخص مربوط به تغییراتی است که در نتیجه تولید مواد اولیه بیوانرژی در خاک رخ می دهد که بر حاصلخیزی خاک تأثیر می گذارد مانند فرسایش خاک، تأثیر مواد آلی، توانایی حفظ آب و غیره.

- **تغییر کاربری زمین**

تغییر کاربری اراضی به تغییری اطلاق می شود که در نتیجه تغییر در سیاست های استفاده و کشت اراضی با محصولات مربوط به تولید مواد خام برای انرژی زیستی رخ می دهد. تولید مواد خام بیوانرژی مستلزم کشت بیشتر محصولات زراعی به جای جنگل است و این امر منجر به تغییر در مدیریت محصول، سیستم های کشت، امنیت غذایی، کاربری اراضی و توسعه روستایی می شود [7]. برای دستیابی به پایداری باید همه این عوامل را در نظر گرفت.

- **آلودگی هوا، آب و زمین**

این شاخص به آلاینده های هوا به غیر از گازهای گلخانه ای، آلاینده های تخلیه شده به زباله های مایع و زباله های جامد تولید شده در طول تولید و استفاده از انرژی زیستی و نحوه رفتار آن اشاره دارد [15]. انرژی زیستی در صورت تولید پایدار می تواند به کاهش تغییرات آب و هوایی کمک کند. علاوه بر این، کربن در جنگل‌ها و خاک‌ها از طریق فعالیت‌های جنگل‌کاری و احیای جنگل‌ها و بهبود شیوه‌های مدیریت زمین و جنگل تثبیت می‌شود. با این حال، توانایی بیوانرژی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای با توجه به الگوهای استفاده از زیست توده متفاوت است.

2.1.3. شاخص فنی

بعد فنی یکی از اساسی ترین ابعاد ارزیابی فناوری های تولید انرژی زیستی پایدار است. شاخص‌های فرعی از نظر فناوری برای اندازه‌گیری تأثیر فناوری در تولیدات فناوری‌های بیوانرژی ایجاد شده‌اند. سه زیرشاخص در این بعد در نظر گرفته می‌شوند [13] [7] [12].

- **بلوغ فناوری**

بلوغ فنی بیانگر میزان بلوغ فناوری و اتکا به کاربردهای انرژی زیست توده ساده و محلی مناسب، مرتبط با قابلیت‌های صنعتی ملی از جمله تجهیزات، قطعات یدکی، مشخصات و استانداردهای فنی، با توجه به فعالیت‌های تحقیق و توسعه در فناوری‌های دارای اولویت ملی علاوه بر توسعه مرتبط با قابلیت‌های فنی است [14] [16].

- **تداوم و پیش بینی عملکرد**

این شاخص یکی از مهم‌ترین استانداردهای فنی برای ارزیابی تولید فناوری‌های بیوانرژی در نظر گرفته می‌شود [12]، زیرا به پیش‌بینی شرایط متغیر الگوهای عملیاتی مختلف در تولید انرژی زیستی اشاره دارد. همچنین نشان دهنده دوره ای است که در آن سیستم با

ظرفیت و بهره وری کامل در طول سال کار خواهد کرد. همچنین قابلیت اطمینان سیستم را با توانایی آن در انجام عملکرد مورد نیاز خود در شرایط خاص و برای یک دوره زمانی مشخص نشان می دهد.

- **تولید برق بالقوه**

این شاخص یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی است که باید در فرآیند ارزیابی فناوری‌های تولید انرژی زیستی مورد توجه قرار گیرد و میزان انرژی قابل تولید سالانه از فناوری‌های انرژی زیستی را نشان می‌دهد [7].

3.1.3. شاخص اقتصادی

بعد اقتصادی به تمام جنبه های اقتصادی مرتبط با فناوری های تولید انرژی زیستی پایدار از مرحله ساخت و ساز تا مرحله تولید انرژی به علاوه بهره برداری و نگهداری اشاره دارد. دو زیرشاخص اصلی در این بعد درنظر گرفته خواهد شد [13] [7] [12].

- **پایداری اقتصاد خرد**

این شاخص نشان دهنده عوامل مرتبط با هزینه های اقتصادی طرح ها و فناوری های انرژی زیستی است. همچنین شامل چندین عامل مرتبط با پروژه های انرژی زیستی است که باید در نظر گرفته شوند، به عنوان مثال، هزینه های ساخت و ساز، هزینه های بهره برداری و نگهداری، دوره بازگشت سرمایه و تولید سالانه [17].

- **پایداری اقتصاد کلان**

این شاخص به سهم فناوری‌های انرژی، به‌ویژه انرژی زیستی که جزو منابع جایگزین انرژی محسوب می‌شود، در بهبود عملکرد کل اقتصاد، افزایش سرمایه‌گذاری‌ها، تضمین دسترسی به خدمات نوین انرژی بر پایه‌های پایدار با هزینه معقول، و کمک به امنیت انرژی در کشور در چارچوب ترکیب انرژی ملی و ساخت و توسعه زیرساخت‌ها، به عنوان مثال، راه‌ها، گسترش شبکه برق و توسعه محل‌های دفن زباله اشاره دارد [7].

4.1.3. شاخص اجتماعی

بیوانرژی می تواند جامعه را از جنبه های مختلفی از جمله مزایای اشتغال و محیط زندگی تحت تاثیر قرار دهد. شاخص‌های فرعی برای اندازه‌گیری تأثیر فناوری‌های تولید انرژی زیستی بر روی جامعه شامل شاخص‌های مختلفی به عنوان تأثیرات بر امنیت غذایی، اشتغال، مشارکت در توسعه منطقه‌ای و سازگاری با چارچوب سیاسی و اداری است [13] [7] [12].

- **اثرات بر روی امنیت غذایی**

این شاخص نشان دهنده تأثیر استفاده از انرژی زیستی بر قیمت و عرضه سبد غذایی است. علاوه بر این، استفاده از زمین برای کشت مواد خام برای تولید انرژی زیستی ممکن است امنیت غذایی را به طور مستقیم در تولید مواد غذایی و به طور غیرمستقیم از طریق افزایش قیمت تحت تاثیر قرار دهد [18] [19].

- **اشتغال**

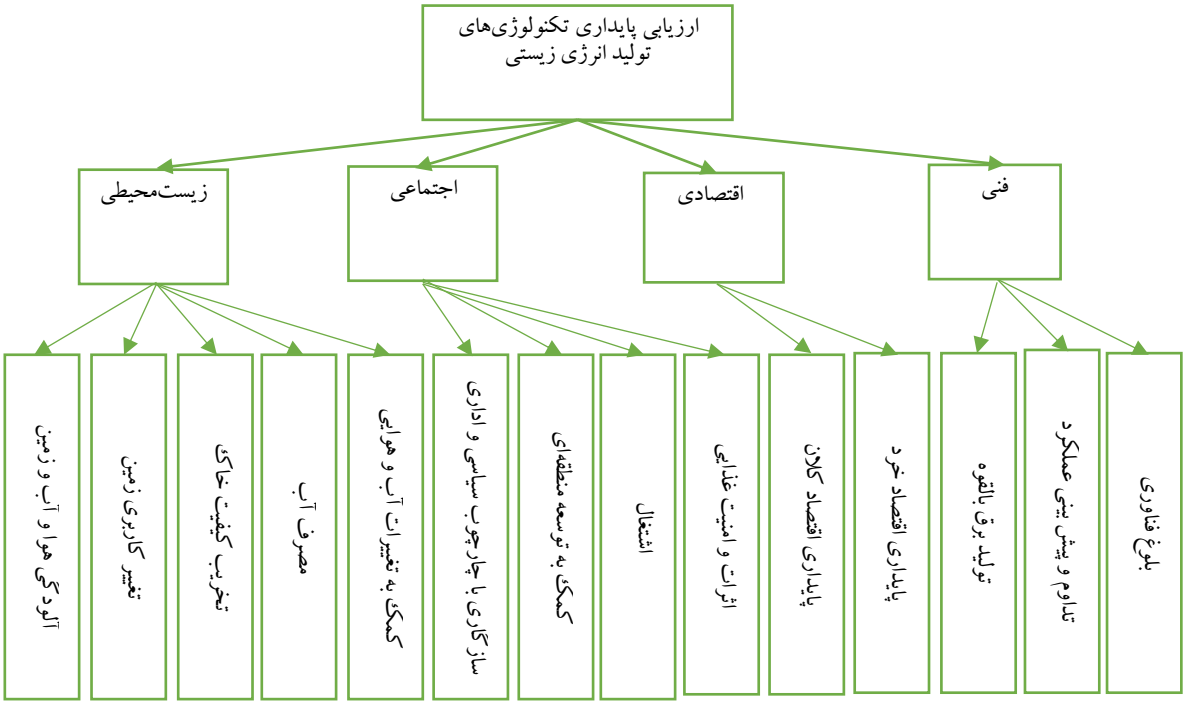
اشتغال حاکی از رونق صنایع و خدمات مرتبط با ایجاد پروژه های انرژی حیاتی است و ممکن است برخی از محرک های بالقوه اشتغال یکی یکی ظهور کنند. بنابراین، استفاده از نیروی کار برای ارزیابی تأثیر، یعنی ایجاد پروژه‌های انرژی زیستی که بر حقوق تأثیر می‌گذارد ضروری است [7] [20].

- **مشارکت در توسعه منطقه‌ای**

این شاخص نشان دهنده پیشرفت به دست آمده توسط مناطقی است که پروژه های انرژی زیستی در آنها ایجاد شده است. در نتیجه پروژه‌های انرژی زیستی، می‌توان به مزایای بسیاری، فقرزدایی، معیشت بهتر و تأمین برق دست یافت [7].

- **سازگاری با چارچوب سیاسی و اداری**

این شاخص به حمایت دولت ها و تدوین راهبردهای توسعه انرژی، منابع آن و تولید انرژی زیستی اشاره دارد. همچنین به تسهیلاتی که دولت در اختیار تولیدکنندگان انرژی قرار می‌دهد، مانند معافیت های مالیاتی، اعتبارات و ضمانت نامه‌ها اشاره دارد.



شکل 1. مدل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

2.3. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

در پژوهش حاضر به منظور تعیین ارجحیت شاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی نسبت به یکدیگر و تعیین ارجحیت فناوری‌های تولید انرژی زیستی نسبت به یکدیگر از نظر هر یک از زیرشاخص‌ها، ۱۹ ماتریس مقایسات زوجی طراحی شده است و با توجه به درنظر گرفتن نظرات ۲۰ خبره نسبت سازگاری برای این ماتریس‌های مقایسات زوجی محاسبه شده است و با توجه به اینکه نسبت سازگاری تمام ماتریس‌ها کوچکتر یا مساوی ۰/۱ حاصل شده است، سازگاری تمام مقایسات زوجی قابل قبول می‌باشد. سپس برای ترکیب نظرات خبرگان از میانگین هندسی استفاده شده است. درواقع، ماتریس مقایسات زوجی گروه از میانگین هندسی عناصر ماتریس‌های مقایسات زوجی آحاد گروه به دست آمده است. بعد از اطمینان‌یابی از سازگاری ماتریس‌ها، اولویت‌بندی انجام گرفت. همانطور که جدول ۱ مشاهده می‌شود، شاخص زیست‌محیطی در ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی دارای بالاترین اهمیت و شاخص فنی دارای کمترین اهمیت است.

جدول 1. رتبه نهایی شاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی

شاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی	وزن شاخص	رتبه شاخص
زیست‌محیطی	0.593	1
فنی	0.049	4
اقتصادی	0.259	2
اجتماعی	0.098	3

سپس زیرشاخص‌های مربوط به هریک از شاخص‌ها نسبت به یکدیگر مقایسه شده‌اند و وزن و رتبه هریک از آن‌ها حاصل شد که در جداول ۲ تا ۵ قابل مشاهده است.

جدول 2. وزن زیرشاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی مرتبط با شاخص زیست‌محیطی

زیرشاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی مرتبط با شاخص زیست‌محیطی	وزن شاخص	رتبه شاخص
کمک به تغییرات آب و هوایی (E۱)	0.545	1
مصرف آب (E۲)	0.232	2
تخریب کیفیت خاک (E۳)	0.120	3
تغییر کاربری زمین (E۴)	0.037	5
آلودگی هوا، آب و زمین (E۵)	0.066	4

جدول 3. وزن زیرشاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی مرتبط با شاخص اجتماعی

زیرشاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی مرتبط با شاخص اجتماعی	وزن شاخص	رتبه شاخص
اثرات بر امنیت غذایی (S۱)	0.277	2
اشتغال (S۲)	0.161	3
کمک به توسعه منطقه‌ای (S۳)	0.096	4
سازگاری با چارچوب سیاسی و اداری (S۴)	0.466	1

جدول 4. وزن زیرشاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی مرتبط با شاخص اقتصادی

زیرشاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی مرتبط با شاخص اقتصادی	وزن شاخص	رتبه شاخص
پایداری اقتصاد خرد (Ec۱)	0.333	2
پایداری اقتصاد کلان (Ec۲)	0.667	1

جدول 5. وزن زیرشاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی مرتبط با شاخص فنی

زیرشاخص‌های ارزیابی پایداری فناوری‌های تولید انرژی زیستی مرتبط با شاخص فنی	وزن شاخص	رتبه شاخص
بلوغ فناوری (Te۱)	0.3	2
تداوم و پیش‌بینی عملکرد (Te۲)	0.6	1
تولید برق بالقوه (Te۳)	0.1	3

پس از آن، هفت فناوری تولید انرژی زیستی شامل تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T1)، تبدیل بقایای جنگل به اتانول (T2)، تبدیل زیست توده مرطوب به بیوگاز (T3)، تبدیل زیست توده مرطوب به جنگل بیودیزل (T4)، تبدیل بقایا به بیودیزل (T5)، تبدیل پسماندهای کشاورزی و شهری به بیوگاز (T6)، و تبدیل نشاسته و ذخایر خوراک مبتنی بر قند به اتانول (T7) بر اساس چهارده زیرشاخص مورد ارزیابی قرار گرفتند. وزن و رتبه هر یک از فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به هریک از زیرشاخص‌های مرتبط با هر شاخص مشخص گردیده است و وزن نسبی به دست آمده برای فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به زیرشاخص‌های مربوط به هر شاخص با یکدیگر ادغام شده و وزن نسبی گزینه‌ها با توجه به هر یک از شاخص‌های اصلی حاصل شده است که در جداول ۶ تا ۹ قابل مشاهده است.

جدول 6. وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص زیست‌محیطی

وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص زیست‌محیطی	وزن گزینه‌ها
تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T۱)	0.232
تبدیل بقایای جنگل به اتانول (T۲)	0.120
تبدیل زیست توده مرطوب به بیوگاز (T۳)	0.037
تبدیل زیست توده مرطوب به جنگل بیودیزل (T۴)	0.066
تبدیل بقایا به بیودیزل (T۵)	0.157
تبدیل پسماندهای کشاورزی و شهری به بیوگاز (T۶)	0.208

تبدیل نشاسته و ذخایر خوراک مبتنی بر قند به اتانول (T۷)	0.084

جدول 7. وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص اجتماعی

وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص اجتماعی	وزن گزینه‌ها
تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T۱)	0.171
تبدیل بقایای جنگل به اتانول (T۲)	0,145
تبدیل زیست توده مرطوب به بیوگاز (T۳)	0.120
تبدیل زیست توده مرطوب به جنگل بیودیزل (T۴)	0.097
تبدیل بقایا به بیودیزل (T۵)	0.107
تبدیل پسماندهای کشاورزی و شهری به بیوگاز (T۶)	0.221
تبدیل نشاسته و ذخایر خوراک مبتنی بر قند به اتانول (T۷)	0.139

جدول 8. وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص اقتصادی

وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص اقتصادی	وزن گزینه‌ها
تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T۱)	0.278
تبدیل بقایای جنگل به اتانول (T۲)	0.142
تبدیل زیست توده مرطوب به بیوگاز (T۳)	0.112
تبدیل زیست توده مرطوب به جنگل بیودیزل (T۴)	0.130
تبدیل بقایا به بیودیزل (T۵)	0.075
تبدیل پسماندهای کشاورزی و شهری به بیوگاز (T۶)	0.167
تبدیل نشاسته و ذخایر خوراک مبتنی بر قند به اتانول (T۷)	0.095

جدول 9. وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص فنی

وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص فنی	وزن گزینه‌ها
تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T۱)	0.206
تبدیل بقایای جنگل به اتانول (T۲)	0.196
تبدیل زیست توده مرطوب به بیوگاز (T۳)	0.114
تبدیل زیست توده مرطوب به جنگل بیودیزل (T۴)	0.084
تبدیل بقایا به بیودیزل (T۵)	0.170
تبدیل پسماندهای کشاورزی و شهری به بیوگاز (T۶)	0.130
تبدیل نشاسته و ذخایر خوراک مبتنی بر قند به اتانول (T۷)	0.101

درنهایت، در جدول ۱۰ وزن نهایی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به چهار شاخص اصلی زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فنی محاسبه شده و فناوری‌ها رتبه‌بندی شده‌اند.

جدول 10. وزن نسبی ترکیبی فناوری‌های تولید انرژی زیستی با توجه به شاخص فنی

اولویت‌بندی نهایی فناوری‌های تولید انرژی زیستی	وزن گزینه‌ها	رتبه گزینه‌ها
تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T۱)	0.237	1
تبدیل بقایای جنگل به اتانول (T۲)	0.133	2
تبدیل زیست توده مرطوب به بیوگاز (T۳)	0.060	5
تبدیل زیست توده مرطوب به جنگل بیودیزل (T۴)	0.038	7
تبدیل بقایا به بیودیزل (T۵)	0.045	6
تبدیل پسماندهای کشاورزی و شهری به بیوگاز (T۶)	0.091	3

تبدیل نشاسته و ذخایر خوراک مبتنی بر قند به اتانول (T۷)	0.077	4	

با توجه به نتایج به دست‌آمده، فناوری تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T1) بهترین فناوری تولید انرژی زیستی پایدار است.

4. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

بخش انرژی جهانی اخیرا شاهد تحولات و تغییرات قابل توجهی بوده است که مشخصه آن افزایش وابستگی به منابع دیگر مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی است. محققان به دنبال بهبود بهره‌وری انرژی و روی آوردن به منابع کم‌کربن، تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست هستند.
در دسترس بودن خدمات انرژی عنصر مهمی در دستیابی به توسعه پایدار است زیرا منابع آن عاملی کلیدی در تقویت تولید و دستیابی به ثبات و رشد در بخش اقتصادی است که منجر به ایجاد شغل و بهبود استانداردهای زندگی می شود. دستیابی به توسعه پایدار مستلزم تعیین استانداردهای کمی برای پایداری است، به عنوان مثال، کارایی انرژی، انرژی و هزینه، چنین معیارهایی باید شامل ملاحظات اجتماعی، سیاسی، زیست محیطی و فنی باشد.
برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌های پایدار پیچیده‌تر و دشوارتر از برنامه‌ریزی و طراحی سنتی است که مطالعات عمیق رویه‌های پایدار را به دلیل افزودن بسیاری از عوامل مرتبط و امکانات چندمنظوره برای پایداری به سیستم‌ها در نظر می‌گیرد. در نتیجه، انتخاب فناوری مناسب برای تولید انرژی زیستی موضوعی حیاتی است که برای تولید انرژی زیستی کارآمد نیاز به تحلیل عمیق دارد.
انواع مختلفی از انرژی های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی، بادی و بیوانرژی وجود دارد. این پژوهش با شناسایی ابعاد اصلی پایداری و زیرشاخص‌های آن‌ها به دنبال ارزیابی و انتخاب بهترین فناوری‌های تولید انرژی زیستی پایدار بوده است.
هفت فناوری تولید انرژی زیستی در نظر گرفته شده است شامل تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T1)، تبدیل بقایای جنگل به اتانول (T2)، تبدیل زیست توده مرطوب به بیوگاز (T3)، تبدیل زیست توده مرطوب به جنگل بیودیزل (T4)، تبدیل بقایا به بیودیزل (T5)، تبدیل پسماندهای کشاورزی و شهری به بیوگاز (T6)، و تبدیل نشاسته و ذخایر خوراک مبتنی بر قند به اتانول (T7) که بر اساس چهار شاخص و چهارده زیرشاخص ارزیابی شد.
شاخص‌های اصلی عبارتند از: شاخص محیطی، شاخص اجتماعی و شاخص اقتصادی و شاخص فنی. شاخص‌های فرعی که فناوری‌های تولید انرژی زیستی بر اساس آن‌ها ارزیابی شدند، سهم در تغییرات اقلیمی، میزان مصرف آب، تخریب کیفیت خاک، تغییر کاربری زمین، آلودگی هوا و آب و زمین، تأثیرات بر امنیت غذایی، اشتغال، کمک به توسعه منطقه‌ای و سازگاری با چارچوب سیاسی و اداری، پایداری اقتصاد خرد، پایداری اقتصاد کلان، بلوغ فناوری، تداوم و قابلیت پیش‌بینی عملکرد، پتانسیل تولید برق هستند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تبدیل محصولات نفتی به بیودیزل (T1) بهترین فناوری انرژی زیستی پایدار است.
برخی از کشورها از جمله مصر دارای منابع عظیم انرژی تجدیدپذیر هستند که می‌توان آن‌ها را توسعه داد تا به تدریج و به طور فزاینده در تأمین نیازهای انرژی بخش‌های مختلف و تنوع بخشیدن به منابع آن‌ها کمک کند، که منجر به صرفه‌جویی در مصرف منابع انرژی سنتی می‌شود. انرژی زیستی یکی از راهبردهای انرژی‌های تجدیدپذیر است، بنابراین دولت‌ها می‌توانند اقدامات سیاسی مختلفی را برای ترویج استقرار انرژی زیستی به دلیل وجود انبار بسیار زیادی از زباله‌های جامد که می‌توان از آن‌ها استفاده کرد، اتخاذ کنند.
نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند از سرمایه‌گذاران در زمینه انرژی زیستی برای انتخاب یک فناوری پایدار که بالاترین کارایی اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی را به دست آورده است، برای تولید انرژی زیستی حمایت کند.
نتایج حاصل از این پژوهش به انتخاب فناوری‌های انرژی زیستی پایدار و تجهیزات کارآمد کمک می‌کند که به ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در سطوح مختلف بازار کار با بومی‌سازی صنعت انرژی زیستی، علاوه بر افزایش استاندارد زندگی و عدالت اجتماعی به دلیل در دسترس بودن خدمات اساسی، کمک می‌کند.
افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود بهره‌وری انرژی زیستی با تنوع بخشیدن به منابع انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌ها و فناوری‌های وارداتی به بهبود امنیت و قابلیت اطمینان عرضه کمک خواهد کرد.

منابع

[1] گرجی تهرانی، پ.، مهردادی، ن.، امیری، م. ج. ۱۳۹۲. بررسی و اولویت‌بندی فناوری‌های مختلف تولید انرژی از منابع زیست‌توده. همایش ملی انرژی های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران، دوره ۵.

[2] اوتادی، ن.، احمدپور، ا.، یوسفی، م. ۱۳۹۱. بررسی روش‌های تولید انرژی از زیست‌توده. سومین همایش بیوانرژی ایران (بیوماس و بیوگاز)

[3] Mangla, S.K., Luthra, S., Jakhar, S., Gandhi, S., Muduli, K., Kumar, A., 2020. A step to clean energy - sustainability in energy system management in an emerging economy context. J. Clean. Prod. 242, 118462. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118462.

[4] Destek, M.A., Sinha, A., 2020. Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: evidence from organisation for economic Co-operation and development countries. J. Clean. Prod. 242, 118537.

[5] Solangi, Y.A., Tan, Q., Mirjat, N.H., Ali, S., 2019. Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: an integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach. J. Clean. Prod. 236, 117655. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117655.

[6] Kılkıs, S., Krajacic, G., Duic, N., Montorsi, L., Wang, Q., Rosen, M.A., Ahmad Al- Nimr, M., 2019. Research frontiers in sustainable development of energy, water and environment systems in a time of climate crisis. Energy Convers. Manag. 199, 111938. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111938.

[7] Khishtandar, S., Zandieh, M., Dorri, B., 2017. A multi criteria decision making framework for sustainability assessment of bioenergy production technologies with hesitant fuzzy linguistic term sets: the case of Iran. Renew. Sustain. Energy Rev. 77, 1130e1145. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.212.

[8] De Corato, U., De Bari, I., Viola, E., Pugliese, M., 2018. Assessing the main opportunities of integrated biorefining from agro-bioenergy co/by-products and agroindustrial residues into high-value added products associated to some emerging markets: a review. Renew. Sustain. Energy Rev. 88, 326e346. https:// doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.041.

[9] Yue, D., You, F., Snyder, S.W., 2014. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: overview, key issues and challenges. Comput. Chem. Eng. 66, 36e56. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016.

[10] Jonkman, J., Kanellopoulos, A., Bloemhof, J.M., 2019. Designing an eco-efficient biomass- ased supply chain using a multi-actor optimisation model. J. Clean. Prod. 210, 1065e1075. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.351.

[11] Awudu, I., Zhang, J., 2012. Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: a review. Renew. Sustain. Energy Rev. 16, 1359e1368. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.016.

[12] Mishra, A.R., Rani, P., Pandey, K., Mardani, A., Streimikis, J., Streimikiene, D., Alrasheedi, M., 2020. Novel multi-criteria intuitionistic fuzzy SWARA-COPRAS approach for sustainability evaluation of the bioenergy production process. Sustain. Times 12, 4155. https://doi.org/10.3390/su12104155.

[13] Kheybari, S., Rezaie, F.M., Naji, S.A., Najafi, F., 2019a. Evaluation of energy production technologies from biomass using analytical hierarchy process: the case of Iran. J. Clean. Prod. 232, 257e265. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.357.

[14] Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., Dufour, J., 2017. A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multicriteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. J. Clean. Prod. 150, 164e174. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.017.

[15] Poeschl, M., Ward, S., Owende, P., 2012. Environmental impacts of biogas deployment e Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. J. Clean. Prod. 24, 184e201. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.030.

[16] Zhang, L., Xin, H., Yong, H., Kan, Z., 2019a. Renewable energy project performance evaluation using a hybrid multi-criteria decision-making approach: case study in Fujian, China. J. Clean. Prod. 206, 1123e1137. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.059.

[17] Zhang, K., Kleit, A.N., 2016. Mining rate optimization considering the stockpiling: a theoretical economics and real option model. Resour. Pol. 47, 87e94. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.01.005.

[18] Buchholz, T., Luzadis, V.A., Volk, T.A., 2009. Sustainability criteria for bioenergy systems: results from an expert survey. J. Clean. Prod. 17, S86eS98. https:// doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.04.015.

[19] Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E.K., Streimikiene, D., 2018. A novel integrated decision-making approach for the evaluation and selection of renewable energy technologies. Clean Technol. Environ. Policy 20, 403e420. https://doi.org/10.1007/s10098-018-1488-4.

[20] Abdel-Basset, M., Gamal, A., Chakrabortty, R.K., Ryan, M.J., 2020. Evaluation of sustainable hydrogen production options using an advanced hybrid MCDM approach: a case study. Int. J. Hydrogen Energy. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene. 2020.10.232.